

Simulation of electron source for next-generation X-ray free-electron laser

Doctoral Thesis**Author(s):**

Candel, Arno Erol

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005082871>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

SIMULATION OF ELECTRON SOURCE FOR NEXT-GENERATION X-RAY FREE-ELECTRON LASER

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
ARNO EROL CANDEL
Dipl. Phys. ETH
born July 13th, 1976
citizen of Untersiggenthal (AG)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. M. Troyer, examiner
Prof. Dr. R. Eichler, co-examiner
Dr. M. Dehler, co-examiner

Abstract

A high-performance parallel computer code for the simulation of electron guns in time-domain has been developed and offers unprecedented accuracy. The code, called *Capone*, is used to investigate the feasibility of a next-generation low-emittance DC gun based on field emission from an array of nanostructured micro-cathodes, expected to drive a compact next-generation X-ray free-electron laser.

A new generation of synchrotron radiation sources with laser-like coherence is needed for future scientific research. X-ray free-electron lasers are expected to deliver ten orders of magnitude higher peak brightnesses than current state-of-the-art light sources, with a thousand times shorter pulses.

For a cost-efficient compact setup currently under consideration at Paul Scherrer Institut (PSI), required beam emittances are twenty times smaller than provided by current state-of-the-art RF guns based on photo emission. This quality is expected only to be realizable with a new generation of electron guns, based on cold field emission from nanostructured field emitter arrays (FEAs), paired with extremely high DC accelerating gradients.

Numerical self-consistent simulations are indispensable for the design of such a low-emittance electron gun. Unfortunately, the complex multi-scale 3D problem leads to big simulation models beyond the limits of current well-established available

codes like MAFIA, which are only able to run on single workstations.

Therefore, a suitable high-performance parallel 3D Maxwell particle-in-cell code has been implemented in C++ using the POOMA II framework on the Linux platform. It is able to run on modern supercomputers and allows unprecedented simulation accuracy through parallel computing. Like MAFIA, the code is based on existing state-of-the-art techniques, but features additional emission models to simulate FEAs, taking various degradation effects into account. Validated against theory as well as against MAFIA for simulations of DC guns and PARMELA for RF guns, the code allows accurate self-consistent multi-scale 3D simulations of realistic FEA-based electron guns.

Within available computational resources, a parameter study of various DC gun setups has been conducted in accordance with PSI design targets. The theoretical feasibility of a next-generation high-brightness, low-emittance electron gun based on emission from a FEA has been examined, optimization feedback has been provided and various production tolerances have been specified.

Zusammenfassung

Ein sehr leistungsfähiges paralleles Computerprogramm, genannt *Capone*, zur Simulation von Elektronenkanonen im Zeitbereich mit bisher unerreichter Genauigkeit wurde entwickelt. Damit wird die Realisierbarkeit einer neuen Generation von DC-Elektronenkanonen mit geringer Emittanz, basierend auf Feld-Emission von einer Anordnung nanostrukturierter Mikrokathoden, untersucht. Eine solche Elektronenkanone soll einen kompakten freien Elektronenlaser im Röntgenbereich antreiben.

Die Forschung der Zukunft benötigt eine neue Generation von Synchrotron-Röntgenlichtquellen mit Laser-ähnlicher Kohärenz. Freie Elektronenlaser im Röntgenbereich sollen zehn Größenordnungen höhere Brillianzen als modernste Lichtquellen liefern, mit tausend mal kürzeren Pulslängen.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) betrachtet zurzeit einen kostengünstigen, kompakten Aufbau, welcher zwanzig mal kleinere Strahlemittanzen erfordert als modernste Photoemissions-RF-Elektronenkanonen zu liefern vermögen. Solch eine Strahlqualität ist wahrscheinlich nur realisierbar mittels einer neuen Generation von Elektronenkanonen, basierend auf Feldemitter-Arrays (FEAs) in Verbindung mit sehr starken DC Beschleunigungsgradienten.

Selbst-konsistente numerische Simulationen sind unerlässlich bei der Entwicklung einer solchen Elektronenkanone geringer Emittanz. Leider führt das komplexe

3D Mehrskalen-Problem zu grossen Simulations-Modellen ausserhalb der Reichweite von herkömmlichen, bewährten Computerprogrammen wie MAFIA, welche nur auf einzelnen Arbeitsplatzrechnern ausgeführt werden können.

Aus diesem Grunde wurde eigens ein sehr leistungsfähiges, paralleles 3D Maxwell particle-in-cell Computerprogramm in C++ implementiert, unter Verwendung der POOMA II Umgebung auf der Linux Plattform. Es kann auf modernen Supercomputern eingesetzt werden und erlaubt bisher unerreichte Simulationsgenauigkeit dank parallelisierter Datenverarbeitung. Der Code basiert, ebenso wie MAFIA, auf modernsten Methoden und bietet zusätzliche Simulationsmodelle für Emission von FEAs unter Berücksichtigung diverser Degradierungseffekte. Der Code ist validiert gegen Theorie sowie gegen MAFIA für Simulation von DC-Elektronenkanonen und PARMELA für RF-Elektronenkanonen und ermöglicht genaue selbst-konsistente 3D Mehrskalen-Simulationen realistischer FEA-basierter Elektronenkanonen.

Eine Parameterstudie verschiedener Anordnungen von Elektronenkanonen wurde durchgeführt, unter Verwendung verfügbarer Ressourcen und unter Berücksichtigung der PSI Design-Parameter. Die theoretische Realisierbarkeit einer neuen Generation von Elektronenkanonen mit hoher Brillianz und niedriger Emittanz, basierend auf Emission von einem FEA, wurde untersucht. Feedback zur Optimierung wurde geliefert und Produktionstoleranzen wurden spezifiziert.